

Sanitary Wastewater Treatment Using Combined Anaerobic and Phytoremediation Systems

Mohammad Mahdi Emamjomeh¹,
Hamza Ali Jamali²,
Maryam Moradnia³,
Shaghayegh Mousavi⁴,
Zeinab Karimi⁵

¹Associate Professor, Department of Environmental Health Engineering, Social Determinant of Health Research Center, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

²Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Qazvin University of Medical Science, Qazvin, Iran

³MSc Student in Environmental Health Engineering, Social Determinant of Health Research Center, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

⁴MSc in Microbiology, Faculty of Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

⁵MSc in Environmental Engineering, Faculty of Health, Qazvin University of Medical Sciences, Qazvin, Iran

(Received December 6, 2015 Accepted April 3, 2015)

Abstract

Background and purpose: Phytoremediation (constructed wetland) is one of the most appropriate technologies for wastewater treatment. The aim of this study was to evaluate the efficiency of the combined anaerobic and phytoremediation systems for sanitary wastewater treatment.

Materials and methods: This experimental study was performed during nine months to measure some parameters including COD, BOD₅, TSS, turbidity, total coliform, and intestinal nematode using combined anaerobic and phytoremediation systems. The samples of wastewater were randomly taken twice per month from the influent and effluent of the septic, wetland and control system. The parameters were measured based on both the Bailenger and standard methods for extermination of water and wastewater. The results were then compared with the Iranian effluent standards for irrigation.

Results: The results showed that by using the hybrid process of anaerobic and phytoremediation systems, the COD and TSS removal rates reached 80% each and the turbidity and BOD₅ removal rates were reported to be 90%. The removal efficiencies of total coliform and intestinal nematode were 99, 999% and 100%, respectively. In this study, the quality of the treated wastewater was found to be acceptable according to the Iranian effluent standards for irrigation.

Conclusion: The combined anaerobic and phytoremediation systems can be used as an efficient process for wastewater treatment.

Keywords: sanitary wastewater treatment, combined anaerobic and phytoremediation systems, constructed wetland

تصفیه فاضلاب بهداشتی به روش استفاده از سیستم های ترکیبی بی هوازی و گیاه پالایی

محمد مهدی امام جمعه^۱

حمزه علی جمالی^۲

مریم مرادنیا^۳

شقایق موسوی^۴

زینب کریمی^۵

چکیده

سابقه و هدف: گیاه پالایی (وتلند) یکی از مناسب ترین تکنولوژی های کاربردی جهت تصفیه انواع فاضلاب ها است. هدف این تحقیق، بررسی کارایی سیستم ترکیبی بی هوازی و گیاه پالایی جهت تصفیه فاضلاب بهداشتی بود.

مواد و روش ها: این مطالعه به صورت آزمایشگاهی به مدت نه ماه جهت اندازه گیری و بررسی پارامترهای COD، BOD₅، TSS، کدورت، کل کلیفرم ها و نماتودهای رودهای به وسیله سیستم ترکیبی بی هوازی و گیاه پالایی مصنوعی انجام گردید. در هر ماه دو مرتبه از فاضلاب ورودی و پساب خروجی به صورت تصادفی و مرکب از قسمت های مختلف (ورودی به سپتیک، ورودی و خروجی از وتلند و شاهد) نمونه برداری شد. پارامترهای فوق بر اساس روش های ذکر شده در کتاب استاندارد متد و روش بیلنجر اندازه گیری و با استانداردهای زیست محیطی ایران جهت استفاده در آبیاری مقایسه گردید.

یافته ها: نتایج نشان داد که با استفاده از سیستم ترکیبی بی هوازی و گیاه پالایی درصد حذف هر یک از پارامترهای COD و TSS حدود ۸۰ درصد و هم چنین درصد حذف BOD₅ و کدورت حدود ۹۰ درصد است. درصد حذف کل کلیفرم ها و نماتود رودهای توسط این سیستم به ترتیب ۹۹/۹۹۹ و ۱۰۰ درصد بود. کیفیت فاضلاب تصفیه شده در این مطالعه مطابق با استاندارد قابل قبول ایران جهت استفاده مجدد از پساب برای آبیاری بود.

استنتاج: سیستم ترکیبی بی هوازی و گیاه پالایی به عنوان یک سیستم کارآمد می تواند در کاهش آلاینده های متداول فاضلاب، استفاده شود.

واژه های کلیدی: تصفیه فاضلاب بهداشتی، سیستم ترکیبی بی هوازی و گیاه پالایی، وتلند

مقدمه

سیستم ها به انرژی های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، باد و انرژی ذخیره ای در توده های زیستی و خاک متکی هستند. از جمله سیستم های طبیعی می توان به سیستم های

سیستم های تصفیه طبیعی یکی از مناسب ترین تکنولوژی های تصفیه برای انواع فاضلاب هستند که در سال های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این

E-mail: maryam.moradnia2000@gmail.com

مؤلف مسئول: مریم مرادنیا- قزوین: دانشگاه علوم پزشکی قزوین

۱. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

۳. دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، مرکز تحقیقات عوامل اجتماعی موثر بر سلامت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

۴. کارشناس ارشد میکروبیولوژی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

۵. کارشناس ارشد محیط زیست، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی قزوین، قزوین، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۹/۱۵ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۳۹۴/۹/۲۶ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۱/۱۵

طبیعی خاک، سیستم های آبرزی و وتلندها اشاره کرد. پس از سیستم برکه های تثبیت، یکی از سیستم های تصفیه طبیعی که طی چند دهه اخیر در بسیاری از کشورهای دنیا، خصوصاً کشورهای توسعه یافته مورد توجه قرار گرفته است، سیستم تصفیه فاضلاب به کمک گیاهان (گیاه پالایی) و یا وتلند می باشد. امروزه درک توانایی گیاهان جهت کمک به تجزیه و تصفیه میکروارگانیسم های بیماریزا و همچنین حذف بسیاری از آلاینده ها، منجر به افزایش بکارگیری سیستم های گیاهی و دامنه وسیعتر تحقیقات در این خصوص شده است (۱). سیستم های وتلند به دلیل توانایی و مکانسیم چندگانه تصفیه (فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی)، طبیعی بودن سیستم، بهره برداری و نگهداری ساده و ارزان و همچنین راندمان بالای تصفیه، روز به روز در حال گسترش می باشد. نقش اصلی گیاهان در این سیستم تأمین اکسیژن مورد نیاز میکروارگانیسم های هتروتروف در ناحیه ریشه، جذب مواد مغذی، افزایش و تثبیت هدایت هیدرولیکی بستر است. و تلندها به عنوان واحد تصفیه ثانویه با کارایی بالایی قادر به حذف انواع آلاینده ها هم چون مواد آلی، مواد غیر آلی و انواع میکروارگانیسم های بیماری زا تا حد قابل قبول می باشند (۲).

وتلندها به دو گروه طبیعی و مصنوعی طبقه بندی می گردند. سیستم های وتلند از لحاظ طراحی به سه دسته سطحی، زیر سطحی و هیبریدی تقسیم بندی می شوند. در حال حاضر وتلندها برای تصفیه فاضلاب های شهری و روستایی، فاضلاب های ته نشین شده اولیه، فاضلاب های ثانویه (پساب حاصل از تصفیه بیولوژیکی)، کاهش آلاینده های سمی، تصفیه شیرابه مراکز دفن زباله، فاضلاب های تولیدی از استخراج معادن، تصفیه فاضلاب های صنعتی، حذف نوترینت ها از فاضلاب به کار می روند (۳). قبل از ورود فاضلاب به وتلند نیاز است که روی آن پیش تصفیه ای صورت پذیرد تا آلودگی آن را کاهش دهد. نظر به اهمیت سپتیک تانک در کاهش آلاینده های فاضلاب، از آن به عنوان گزینه

مناسب و موقت دفع فاضلاب استفاده می شود (۴). بسیاری از مطالعات، کارایی سیستم های وتلند را نسبت به برکه های اختیاری بالاتر نشان داده اند (۵، ۶). هم چنین وتلندها با جریان زیرسطحی نسبت به وتلندهای سطحی عموماً مقدار تصفیه بالاتری را نشان داده اند (۳).

یوسفی و همکاران، سیستم وتلند زیرسطحی با جریان افقی را به کمک گیاه فراگماتیس استرالیس، در کاهش آلاینده های فاضلاب شامل BOD_5 ، COD، TKN، TP و کدورت موثر نشان دادند. درصد کارایی حذف این آلاینده ها به ترتیب $81/47$ ، $78/5$ ، $87/87$ ، $76/18$ و $97/8$ درصد گزارش گردید (۵). ترنگ و همکاران نیز بالاترین درصد حذف BOD_5 ، COD و TSS از فاضلاب بهداشتی را توسط سیستم وتلند با جریان زیر سطحی به ترتیب 83 ، 84 و 95 درصد گزارش کردند (۶). نتایج پژوهش قهرمانی و همکاران با هدف بررسی کارایی وتلند زیرسطحی برای تصفیه پارامترهای BOD_5 ، COD و TSS نشان داد که این سیستم ها توانایی حذف هر یک از این پارامترها را به میزان $67/89$ ، $70/99$ و $83/86$ درصد به ترتیب بر اساس ورودی $BOD_5=139/18$ ، $COD=139/75$ و $TSS=307$ میلی گرم در لیتر دارد (۷). مطالعات نشان داده اند که سیستم های ترکیبی وتلند با کارایی بالاتری قادر به حذف آلاینده های مختلف فاضلاب هستند. ملیان و همکاران در یک بررسی، سیستم های ترکیبی وتلند را برای تصفیه فاضلاب شهری کارآمد دانستند، به طوری که میانگین حذف برای هر یک از پارامترهای BOD_5 ، COD و SS به ترتیب 86 ، 80 و 96 درصد به دست آمد (۸). هم چنین Xinshan و همکاران کارایی سیستم ترکیبی وتلند زیر سطحی با جریان افقی و جریان عمودی برای حذف آلاینده های BOD_5 ، COD را برای هر دو آلاینده 94 درصد اعلام کردند (۹).

این مطالعه با هدف تصفیه فاضلاب بهداشتی با استفاده از سیستم های ترکیبی بی هوازی (سپتیک تانک) و گیاه پالایی به کمک وتلند جهت بررسی و اندازه گیری

پارامترهای COD، BOD₅، TSS، کدورت، کل کلیفرم‌ها و نماتودهای روده‌ای انسان انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

مشخصات سپتیک تانک و وتلند

این مطالعه به صورت تجربی با استفاده از سیستم ترکیبی بی‌هوازی و وتلند به صورت عملی در مقیاس واقعی انجام گرفت. دبی ورودی به سیستم سپتیک تانک برای جمعیت ۲۰۰ نفر و بر اساس زمان ماند ۲ الی ۴ روز بر اساس دبی حداقل و حداکثر فاضلاب تولیدی، ۳۲ متر مکعب در روز برآورد گردید. دو واحد سیستم وتلند و شاهد (بدون کشت گیاه) هر کدام به مساحت کل ۸۰ متر (مساحت کل ۱۶۰ متر مربع) و با عمق ۱ متر (۱ m × ۴ m × ۲۰ m) و زمان ماند ۱/۵ الی ۳ روز با توجه به دبی حداقل و حداکثر فاضلاب تولیدی، برای بررسی و اندازه‌گیری پارامترهای کیفی فاضلاب شامل COD، BOD₅، TSS، کدورت، کل کلیفرم‌ها و نماتودهای روده‌ای انسان انجام شد. گیاه مورد استفاده برای تصفیه فاضلاب در این مطالعه ترکیبی از نی محلی رودخانه فصلی منطقه شمال قزوین و گیاه ویتور (Vetiveria Zizonioides) بود. دلیل استفاده از دو نوع گیاه، به جهت مقاومت آن‌ها، در شروع زمان بهره‌برداری از سیستم ترکیبی در فصل سرما بود.

نمونه‌برداری و آنالیز آماری

این مطالعه به صورت تجربی در یک دوره نه ماهه انجام پذیرفت. جامعه‌ی مورد مطالعه فاضلاب بهداشتی یکی از پادگان‌های آموزشی شهر قزوین بود. در ابتدا بازدیدهای میدانی با هدف اطلاع از میزان حجم فاضلاب تولیدی، نوع فاضلاب ورودی به سیستم تصفیه، چگونگی انتقال فاضلاب به سیستم بی‌هوازی و وتلند، اطلاع از خروجی‌های سیستم و چگونگی دفع آن به محیط زیست و تعیین ایستگاه‌های نمونه‌برداری در نقاط مختلف سیستم انجام گرفت. در هر ماه دو مرتبه از فاضلاب

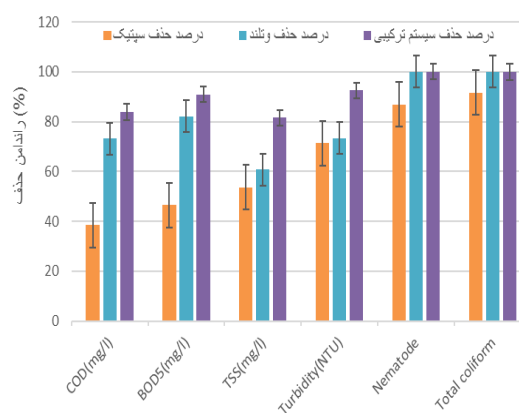
ورودی و پساب خروجی به صورت تصادفی و مرکب از ۵ قسمت (ورودی به سپتیک، ورودی به سیستم وتلند و شاهد، خروجی از وتلند و شاهد) نمونه‌برداری انجام گردید. تعداد کل ۲۷۰ نمونه در ۱۸ مرتبه نمونه‌برداری جمع‌آوری گردید. نمونه‌گیری با استفاده از ظروف مخصوص نمونه‌برداری فاضلاب (جهت آنالیز فیزیکی، شیمیایی و میکروبی) از نقاط نمونه‌برداری انجام و نمونه‌ها در کم‌تر از ۴۸ ساعت و در شرایط دمایی ۴- درجه سانتی‌گراد به آزمایشگاه دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی قزوین منتقل گردید. شمارش تعداد تخم انگل‌های نماتود روده‌ای بر اساس روش Bailer (۱۰) انجام گردید. در ابتدا حدود ۴ ساعت به نمونه‌ها اجازه ته‌نشینی داده شد، سپس ۹۰ درصد مایع رویی با استفاده از سیفون خارج شد و رسوب باقیمانده در کف لوله به چند لوله سانتریفیوژ منتقل شد. سپس در ۱۰۰۰ گرم به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. کل رسوب موجود در لوله‌های سانتریفیوژ مجدداً به یک لوله وارد گردید و دوباره در ۱۰۰۰ گرم به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شد. در مرحله بعد یک برابر حجم رسوب تشکیل شده در مرحله دوم سانتریفیوژ، بافر استواسیتیک (pH = ۴/۵) و دو برابر حجم آن، استات استیل به لوله سانتریفیوژ اضافه گردید. پس از آن که نمونه توسط همزن کامل یکسان گردید، در ۱۰۰۰ گرم مجدداً به مدت ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ شدند. سپس رسوب نهایی در پنج حجم سولفات روی ۳۳ درصد مخلوط و معلق گردید. حجم این محلول نهایی ثبت گردید. سپس به وسیله پیت پاستور، محصول نهایی به سه لام مک مستر با حجم ۰/۳ میلی لیتر منتقل و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی ۱۰× و ۴۰× مشاهده گردید. تعداد تخم انگل‌ها در یک لیتر نمونه با استفاده از فرمول $N = AX/PV$ برآورد گردید (N = تعداد تخم انگل در یک لیتر نمونه، A = میانگین تعداد تخم انگل شمارش شده، X = حجم محصول نهایی (میلی لیتر)، P = حجم لام مک مستر (۰/۳ میلی لیتر) و V = حجم نمونه اولیه (لیتر)). سایر پارامترهای مورد بررسی

یافته ها

پس از انجام آزمایشات و جمع آوری اطلاعات و آنالیزهای آماری، نتایج مطالعه به صورت جداول و نمودارهای زیر به طور خلاصه ارائه شد. کیفیت فاضلاب ورودی به واحدهای بی هوازی، سیستم وتلند مصنوعی و پساب خروجی از آن در طی نه ماه برای پارامترهای مورد مطالعه در جداول شماره ۱ و ۲ نشان داده شده است.

میانگین و انحراف معیار پارامترهای مطالعه برای فاضلاب ورودی به سیستم بی هوازی و وتلند و پساب خروجی نهایی از سیستم ترکیبی بی هوازی- وتلند و همچنین استانداردهای زیست محیطی ایران جهت استفاده مجدد برای آبیاری در جدول شماره ۳ ارائه گردیده است. نتایج مطالعه نشان می دهد که مقادیر BOD_5 ، COD و کدورت پس از پیش تصفیه با سیستم سپتیک تانک بالاتر از استانداردهای زیست محیطی ایران جهت آبیاری و خروجی از سیستم ترکیبی بی هوازی- وتلند پایین تر از آن می باشند.

میانگین درصد حذف پارامترهای BOD_5 ، COD ، TSS ، کدورت، نماتود و کل کلیفرم ها توسط سیستم بی هوازی، وتلند و سیستم ترکیبی سیستم بی هوازی- وتلند در نمودار شماره ۱ نشان داده شده است.

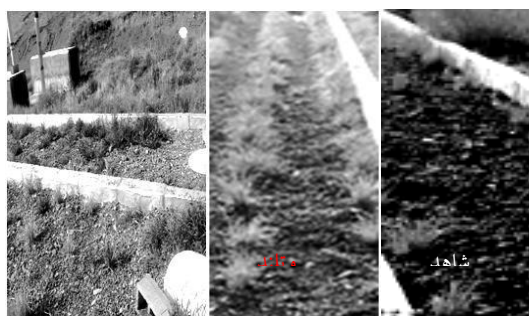


نمودار شماره ۱: میانگین راندمان حذف پارامترهای BOD_5 ، COD ، TSS ، کدورت، نماتود و کل کلیفرم ها توسط سیستم بی هوازی، وتلند و سیستم ترکیبی سیستم بی هوازی- وتلند

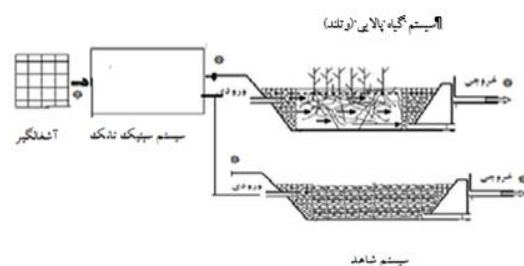
در این مطالعه بنا بر روش های ذکر شده در کتاب استاندارد متد (۱۱) اندازه گیری و ثبت گردید. خطای آزمایش با استفاده از تکرار آزمایش کاهش داده شد. تجزیه و تحلیل نمونه ها با استفاده از روش آماری Paired Sample Test با کمک نرم افزار SPSS ۱۶ انجام شد. پارامترهای مورد بررسی با استانداردهای ارائه شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایران (IRNDOE) جهت استفاده مجدد در آبیاری مقایسه گردید. تصاویر شماره ۱ و ۲ به ترتیب نمایی از سیستم بی هوازی و وتلند و تصویر شماره ۳ نمایی از مسیر سیستم تصفیه فاضلاب و محل های برداشت نمونه را نشان می دهد.



تصویر شماره ۱: نمایی از سیستم بی هوازی (سپتیک تانک)



تصویر شماره ۲: نمایی از سیستم وتلند و شاهد



تصویر شماره ۳: مسیر تصفیه فاضلاب و محل های برداشت نمونه

جدول شماره ۱: کیفیت فاضلاب ورودی به سیستم بی هوازی و وتلند و پساب خروجی از آن از لحاظ پارامترهای COD, BOD₅, TSS (mg/l) و کدورت (NTU)

پارامتر	COD (میلی گرم بر لیتر)			BOD ₅ (میلی گرم بر لیتر)			TSS (میلی گرم بر لیتر)			کدورت (NTU)			زمان نمونه برداری	
	*۱	*۲	*۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳		
آبان	۶۷۸	۳۴۲	۱۱۱	۵۲۳	۲۶۶	۵۸	۱۳۸	۶۸	۳۱	۶۹۶	۲۲۰	۵۳	هفته اول	
	۶۸۲	۳۳۴	۱۰۵	۵۱۱	۲۷۰	۶۱	۱۴۴	۶۹	۲۲	۷۰۲	۲۵۷	۵۵	هفته سوم	
آذر	۶۸۰	۳۴۳	۱۱۲	۵۲۱	۲۷۲	۵۲	۱۳۲	۶۷	۲۵	۷۱۲	۲۴۹/۵	۵۶	هفته اول	
	۶۸۵	۳۶۵	۱۰۰	۵۰۹	۲۷۳	۵۳	۱۵۴	۶۷	۲۷	۶۸۷/۵	۲۰۲	۵۲	هفته سوم	
دی	۶۵۶	۳۷۲	۱۰۲	۴۹۳	۲۶۹	۴۲	۱۲۳	۶۶	۳۹/۸	۶۷۲	۱۸۹	۴۸	هفته اول	
	۶۵۰	۳۷۷	۱۰۰	۴۹۰	۲۷۴	۴۳	۱۱۳	۶۲	۲۶/۱	۶۴۲	۲۱۲	۴۹	هفته سوم	
بهمن	۶۰۵	۳۷۴	۱۰۴	۴۹۰	۲۶۳	۴۴	۱۴۳	۶۵	۲۶	۵۸۳	۱۶۶	۴۴	هفته اول	
	۶۰۰	۳۶۸	۱۰۵	۴۸۸	۲۶۱	۴۶	۱۳۴	۶۴	۳۳/۳	۶۰۸	۱۵۳	۴۸	هفته سوم	
اسفند	۶۶۰	۳۷۱	۹۸	۴۸۹	۲۶۱	۴۳	۱۳۰	۶۷	۳۴/۱	۵۰۱	۱۶۰	۴۶	هفته اول	
	۶۸۷	۳۶۸	۹۶	۴۹۰	۲۵۷	۴۱	۱۳۰	۶۳	۳۵/۱	۵۱۸	۱۵۲	۴۵	هفته سوم	
فروردین	۶۵۶	۳۷۵	۹۸	۴۹۳	۲۵۵	۴۳	۱۴۲	۶۰	۴۲/۱	۵۲۴	۱۳۳	۴۳	هفته اول	
	۶۸۰	۳۷۶	۹۶	۴۹۰	۲۲۰	۴۳	۱۳۸	۵۹	۴۳/۵	۶۴۰	۱۵۶	۳۹	هفته سوم	
اردیبهشت	۴۹۳	۳۶۶	۹۳	۴۸۷	۲۲۱	۳۷	۱۳۵	۵۵	۱۶/۴	۵۸۳	۱۵۱	۴۱	هفته اول	
ت	۵۰۳	۳۷۸	۹۴	۴۹۰	۲۰۲	۳۹	۱۲۱	۵۷	۹/۲	۶۰۲/۵	۱۴۴	۳۵	هفته سوم	
خرداد	۴۵۶	۳۶۱	۸۴	۲۴۲	۱۵۹	۲۶	۱۲۵	۵۳	۸/۴	۵۰۱	۱۳۲	۳۳	هفته اول	
	۴۸۹	۳۷۲	۸۶	۲۵۳	۱۶۳	۲۵	۱۲۵	۵۵	۷/۸	۴۹۲	۱۳۸	۳۲	هفته سوم	
تیر	۵۲۰	۳۷۱	۸۰	۲۲۳	۱۳۴	۲۶	۱۲۰	۵۳	۸/۲	۴۲۰/۳	۱۱۲	۳۵	هفته اول	
	۵۱۸	۳۶۰	۷۸	۲۴۳	۱۳۷	۲۳	۱۲۴	۴۸	۷/۱	۴۱۳/۸	۱۲۱	۳۹	هفته سوم	

* (۱): فاضلاب ورودی به سیستم بی هوازی، ۲: پساب ورودی به وتلند، ۳: پساب خروجی از وتلند

جدول شماره ۲: کیفیت فاضلاب ورودی به سیستم بی هوازی و وتلند و پساب خروجی از آن از لحاظ دو پارامتر کل کلیفرم (MPN/100ml) و نماتود روده ای (۱۰۰/عدد)

پارامتر	کل کلیفرم MPN/100ml			نماتود (۱۰۰/عدد)			زمان نمونه برداری	
	۱	۲	۳	۱	۲	۳		
آبان	۹/۶E۸	۸/۶E۷	۱۰۲۰	۱	۰	۰	هفته اول	
	۸/۶E۸	۸/۴E۷	۱۰۸۱	۱	۱	۰	هفته سوم	
آذر	۸E۸	۷/۷E۷	۱۰۰۱	۲	۰	۰	هفته اول	
	۹E۸	۶/۳E۷	۱۲۲۲	۱	۰	۰	هفته سوم	
دی	۵/۷E۸	۶/۵۸E۷	۱۵۲۱	۱	۰	۰	هفته اول	
	۷/۳E۸	۶/۳E۷	۱۳۰۰	۲	۱	۰	هفته سوم	
بهمن	۶/۹E۸	۷/۰۲E۷	۱۶۵۱	۳	۰	۰	هفته اول	
	۸/۲E۸	۷/۴E۷	۱۷۶۷	۴	۰	۰	هفته سوم	
اسفند	۷/۹E۸	۷/۸۹E۷	۱۷۸۹	۲	۰	۰	هفته اول	
	۸E۸	۶/۹۷E۷	۱۷۳۳	۴	۱	۰	هفته سوم	
فروردین	۹E۸	۷/۲۳E۷	۱۵۰۱	۳	۰	۰	هفته اول	
	۶/۶E۸	۵/۱۲E۷	۱۰۱۲	۱	۰	۰	هفته سوم	
اردیبهشت	۵/۹E۸	۵/۰۱E۷	۸۸۵	۱	۰	۰	هفته اول	
	۸/۳E۸	۴/۱۸E۷	۹۰۲	۱	۰	۰	هفته سوم	
خرداد	۹/۱E۸	۳/۷۳E۷	۸۹۴	۳	۰	۰	هفته اول	
	۷E۸	۴/۰۴E۷	۹۵۶	۳	۲	۰	هفته سوم	
تیر	۴/۴E۸	۲/۹۹E۷	۹۹۲	۱	۰	۰	هفته اول	
	۲/۲E۸	۱/۱۸E۷	۸۸۷	۴	۰	۰	هفته سوم	

جدول شماره ۳: میانگین و انحراف معیار پارامترهای COD, BOD₅, TSS, کدورت، نماتود و کل کلیفرم ها توسط سیستم بی هوازی، وتلند و سیستم ترکیبی سیستم بی هوازی - وتلند

پارامتر	واحد	فاضلاب خام	خروجی شاهد (خاک)	راندمان حذف سیتم شاهد	ورودی به سیستم وتلند (خاک + گیاه)	خروجی از سیستم وتلند	استاندارد ایران برای آبیاری
COD	mg/l	۶۰۵/۴±۸۳/۷	۱۹۵±۶/۱۵	۴۶/۶	۳۶۵±۱۲/۸	۹۷/۸۸±۱۱/۶	۲۰۰
BOD ₅	mg/l	۴۴۰/۲۷±۱۱۰/۷	۹/۶±۱۰/۱	۵۶/۳	۲۳۰/۹±۵۰	۴۱/۳۸±۱۱	۱۰۰
TSS	mg/l	۱۳۱/۷۲±۱۰/۳	۳۴±۱/۸	۴۴/۳	۶۱±۶/۶۲۵	۲۴/۵±۱/۳	۱۰۰
کدورت	NTU	۵۸۸/۸±۹۴/۶	۵۲±۴/۶	۶۹/۲	۱۶۹/۳±۴۲/۷	۴۴±۷/۵	۵۰
نماتود	(عدد/۱۰۰ ml)	۲/۱۱±۱/۱۸	۰/۰۵±۰/۰۱	۹۶/۳	۰/۵±۰/۲۷	۰	کمتر از ۱
کل کلیفرم	(MPN/100ml)	۷/۸۱ E۸±۱/۳۲E۸	۶/۶۸ E۵±۲E۴	۹۹	۵/۲ E۷±۶/۸E۷	۱/۲۲ E۳±۵۵۴۲	۱۰۰۰

مطابق نمودار شماره ۱ درصد حذف COD، TSS، BOD₅، کدورت، نماتود و کل کلیفرم ها توسط سیستم سپتیک بی هوازی به ترتیب ۳۸/۴۰، ۴۶/۵۰، ۵۶/۳، ۷۱/۴، ۸۶/۸۴ و ۹۲/۴۴ درصد می باشد. درصد حذف پارامترهای مذکور توسط سیستم وتلند به ترتیب ۷۳/۱۲، ۸۲/۱۴، ۹۰/۷۶، ۷۳/۳۹ و ۱۰۰ و ۹۹/۹۹ درصد به دست آمد. هم چنین سیستم ترکیبی بی هوازی- وتلند برای هر یک از پارامترهای ذکر شده با راندمان ۸۳/۸۶، ۹۰/۴۹، ۸۱/۵۳، ۹۲/۴۶، ۱۰۰ و ۹۹/۹۹ درصد کارایی بالاتری را نسبت به سیستم های سپتیک تانک و وتلند نشان داد.

بحث

از آن جا که استفاده از سیستم های تصفیه پیچیده برای جوامع کوچک از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست، وتلندها گزینه ای مناسب برای تصفیه فاضلاب در این جوامع می باشند. مطابق نتایج به دست آمده، سیستم گیاه پالایی به کمک وتلند با کارایی بالاتری در مقایسه با سیستم بی هوازی سپتیک تانک در کاهش آلاینده های COD، BOD₅، TSS، کدورت، نماتود و کل کلیفرم ها نقش داشت. سیستم بی هوازی سپتیک تانک به جز کاهش TSS، به تنهایی قادر به پایین آوردن سایر پارامترهای مورد مطالعه به حد قابل قبول استاندارد نمی باشد. هم چنین سپتیک تانک قادر به کاهش بیش از log ۱ کل کلیفرم ها نمی باشد. پساب خروجی از سپتیک تانک به علت در برداشتن باکتری های بیماری زا، کیست و تخم انگل هایی که کاملاً از بین نرفته اند از نظر بهداشتی مخاطره انگیز می باشند. بنابراین معمولاً از سیستم های سپتیک تانک به عنوان پیش تصفیه استفاده می شود. در این تحقیق کاهش تعداد تخم انگل های نماتود توسط سیستم بی هوازی سپتیک تانک ۸۶/۸۴ درصد گزارش گردید. اگرچه درصد بالای حذف نماتودها توسط سپتیک تانک به دلیل زمان ماند کافی و ته نشین شدن گزارش گردیده است اما سیستم سپتیک تانک قادر به حذف کامل آن ها نمی باشد. سازمان بهداشت جهانی بر

مخاطره آمیز بودن عفونت های ناشی از انگل ها روده ای، هم برای کارگران و هم برای استفاده از این نوع پساب ها در آبیاری تاکید کرده است (۱۲). شافی و خطیب میزان حذف آلاینده های COD، BOD₅ و TSS را با استفاده از سیستم پیش تصفیه سپتیک تانک برای تصفیه فاضلاب بهداشتی را به ترتیب ۴۱، ۴۶ و ۵۹ درصد گزارش کردند (۴). نتایج مطالعه ذکر شده در راستای نتایج مطالعه حاضر می باشد. با توجه به این نتایج می توان بیان نمود که در سیستم های بی هوازی سپتیک تانک که به درستی طراحی شده باشند، با زمان ماند مناسب و نزدیک شدن رژیم جریان به جریان نهر گونه باعث افزایش حذف آلاینده ها در خروجی سیستم های گیاهی خواهند شد. مطالعات متعددی به نقش گیاهان و سیستم های وتلند برای حذف موثر مواد آلی و غیر آلی اشاره کرده اند (۵،۳) در سیستم های گیاه پالایی به کمک وتلند با جریان زیر سطحی، علاوه بر گیاه، خاک نیز به کاهش آلاینده ها کمک می کند. از مکانیسم های اصلی کاهش مواد قابل تجزیه بیولوژیکی در وتلندها، فیلتراسیون، تبدیل بیولوژیکی BOD₅ محلول توسط میکروارگانیسم به خصوص باکتری ها، جذب و لخته سازی و ته نشینی می باشد. فیلتراسیون و ته نشینی نیز از مکانیسم های اصلی حذف کدورت و TSS توسط سیستم های وتلند می باشند (۱۳،۲). فرآیندهای حذف باکتری ها و انگل ها نیز شامل جذب سطحی، فیلتراسیون، ته نشینی، شکار، تجزیه طبیعی، ترشح آنتی بیوتیک، عمل ضد میکروبی میکروفلورای خاک و ریشه و همچنین دمای نامناسب می باشد (۱۴).

یوسفی و همکاران گزارش کردند که سیستم وتلند برای فاضلاب های ضعیف و یا فاضلاب مجتمع با غلظت COD در محدوده ۱۳۰ تا ۲۰۰ میلی گرم در لیتر در دستیابی به محدوده استاندارد تخلیه به آب های سطحی و زیرزمینی موفق عمل کرده است (۵). میزان حذف BOD₅ توسط سازمان EPA به وسیله وتلند زیر سطحی ۵۰ تا ۹۰ درصد گزارش شده است (۱۵) هم چنین نتایج مطالعه مروری تشییعی و همکاران نشان داد که میانگین راندمان حذف

BOD₅ و TSS در تصفیه فاضلاب با وتلندهای زیرسطحی در سایر کشورها و ایران به ترتیب ۹۱/۶، ۸۱/۶ و ۷۷، ۸۳ درصد بود (۱۶). نتایج مطالعات ذکر شده تاییدکننده نتایج مطالعه حاضر می باشد. از آنجا که شرایط آب و هوایی یکی از پارامترهای مهم در عملکرد سیستم تصفیه گیاه پالایی می باشد، بنابراین می توان گفت در شرایط آب و هوایی مشابه نتایج عملکرد سیستم های وتلند تقریباً همخوانی دارند. طبق نتایج به دست آمده از تحقیق احرامپوش و همکاران، سیستم وتلند مصنوعی زیرسطحی با گیاه نخل مرداب قادر به کاهش پارامترهای BOD₅، TSS، COD، کل کلیرم ها و کلیرم های گوارشی به میزان به ترتیب ۷۴، ۷۳، ۷۰، ۳۳ و ۳۸ درصد بود (۱۷). هم چنین نتایج مطالعه حاضر برای پارامترهای BOD₅ و COD بالاتر از تحقیق انجام شده توسط Trang (۶) و قهرمانی (۷) با هدف استفاده از سیستم وتلند مصنوعی برای فاضلاب بهداشتی بود که یکی از دلایل آن می تواند استفاده از سیستم ترکیبی و عملکرد بهتر این سیستم، نسبت به سیستم های تک واحدی می باشد.

Ge و همکاران راندمان حذف BOD₅، TSS و COD با استفاده از سیستم وتلند زیر سطحی با جریان افقی را به ترتیب ۷۴/۱، ۸۹/۵ و ۸۲/۲ درصد گزارش نمودند (۱۸). نتایج این مطالعه با پژوهش یوسفی و همکاران (۵) که از سیستم وتلند مصنوعی با گیاه نی فراگماتیس استرالیس بومی در شرایط اقلیمی مازندران و همچنین مطالعات مشابه دیگر (۱۹) هم خوانی دارد که یکی از علل آن می تواند استفاده از گیاه مقاوم به شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه و همچنین استفاده از وتلند با جریان افقی مشابه با مطالعه ذکر شده باشد. پژوهش های مختلف به کارگیری انواع سیستم های ترکیبی مانند سیستم هیبریدی وتلند- لاگون هوادهی (۲۰)، سیستم هیبریدی جریان افقی- عمودی (۲۱) و سیستم ترکیبی سپتیک تانک- وتلند زیرسطحی (۴) را برای حذف آلاینده های مختلف از فاضلاب مانند BOD₅، COD و TSS موثر نشان داده اند. نتایج به دست آمده از این

مطالعه بیانگر آن بود که سیستم ترکیبی بی هوازی- گیاه پالایی به کمک وتلند با کارایی بالاتری نسبت به سیستم های بی هوازی سپتیک تانک و وتلند عمل کرده است. مطابق نتایج ارائه شده در جدول شماره ۳، سیستم ترکیبی بی هوازی- وتلند با تامین استاندارد های زیست محیطی ایران جهت مصارف آبیاری برای هر یک از پارامترهای COD، BOD₅، TSS، کدورت و نماتود ها عملکرد مناسبی را نشان داده است. عملکرد مناسب سیستم بی هوازی سپتیک تانک و همچنین حذف آلاینده ها در وتلند زیرسطحی به علت یکسان بودن شرایط بارگذاری، دارای خروجی نهایی نزدیک به استانداردهای زیست محیطی بود.

Cui و همکاران متوسط نرخ حذف COD و BOD₅ را توسط سیستم ترکیبی وتلند برای تصفیه جریان خروجی از سیستم سپتیک تانک با استفاده از گیاه *Schoenoplectus Lacustris* و *Cyprus Alternifolius* را به ترتیب نزدیک به ۸۵ و ۸۲ درصد گزارش کردند و نتایج نشان دهنده بالارفتن کارایی حذف پارامترهای ذکر شده در سیستم های ترکیبی سپتیک تانک- وتلند بود (۲۲). نتایج مطالعه حاضر راندمان بالاتری را برای این دو پارامتر نشان داد.

Xinshan و همکاران سیستم ترکیبی وتلند با جریان زیرسطحی افقی و عمودی را در تصفیه فاضلاب خانگی موثر دانستند (۹). نتایج مطالعه مروری سیدی و همکاران نشان داد که سیستم های ترکیبی باعث حذف بیش تر آلاینده های BOD₅ و TSS نسبت به سیستم های وتلند مصنوعی به تنهایی می شوند (۳). هم چنین Seo و همکاران سیستم هیبریدی مصنوعی با جریان زیر سطحی افقی و عمودی برای فاضلاب کشاورزی را با استفاده از گیاه *Thiobacillus Denitrificans* برای حذف COD و TSS به ترتیب ۵۳ و ۹۱ درصد گزارش نمودند (۲۳). نتایج مطالعه حاضر راندمان بالاتری را برای حذف COD نشان داده است که می توان به مقاومت گیاه مورد استفاده، شرایط محیطی و نوسانات جریان ورودی نسبتاً

پایدار اشاره نمود. میزان حذف کل کلیرم و تخم انگل نماتود روده‌ای توسط سیستم ترکیبی سپتیک تانک-وتلند به ترتیب (5log) ۹۹/۹۹ و ۱۰۰ درصد گزارش شد. با توجه به نتایج ارائه شده (جدول شماره ۳) جهت دستیابی به استانداردهای خروجی برای کل کلیرم در پساب خروجی از سیستم ترکیبی بی‌هوازی-وتلند، به‌کارگیری واحد گندزدایی، پس از سیستم وتلند زیرسطحی، لازم خواهد بود.

شرفی و همکاران در مطالعه‌ای میانگین راندمان زدایش تخم انگل توسط سیستم وتلند مصنوعی را ۹۹/۷ تا ۱۰۰ درصد گزارش کردند (۲۴). همچنین شافی و ختیب درصد حذف سیستم ترکیبی سپتیک تانک-وتلند مصنوعی برای حذف کل کلیرم‌ها را ۵ log گزارش کردند (۴). نتایج تحقیق حاضر با مطالعات ذکر شده هم‌خوانی دارد. زیرا در سیستم‌های وتلند بر اثر فیلتراسیون بستر، درصد حذف تخم انگل‌ها و سایر عوامل میکروبی بالا می‌باشد. مشخص شده است که در سیستم‌های بدون گیاه، با اضافه نمودن گیاه به سیستم، حذف آلاینده‌ها بهتر انجام می‌گیرد (۲۵). مطابق نتایج مطالعه حاضر (جدول شماره ۳) سیستم وتلند مصنوعی در مقایسه با سیستم شاهد (بدون گیاه) برای حذف TSS و کدورت عملکرد محسوسی را نشان نداده است. اما برای COD و BOD₅ تفاوت زیادی در میزان حذف توسط سیستم وتلند و سیستم شاهد دیده شد. بنابراین می‌توان گفت که بستر خاک به دلیل سرعت نسبتاً پایین جریان و مساحت سطح فراوان نقش مهمی برای فیلتراسیون و کاهش TSS و کدورت دارد. با توجه به تجربیات فوق و کارآمدی روش‌های طبیعی تصفیه، در شرایط آب و هوایی ایران کارآیی سیستم‌های گیاه پالایی در کشور ما را نشان می‌دهد. آنچه که به‌عنوان دستاورد ارزشمند

این پژوهش تلقی می‌شود، استفاده از تکنولوژی سازگار با محیط زیست، ساده و ارزان سیستم ترکیبی بی‌هوازی و گیاه پالایی به کمک وتلند برای تصفیه فاضلاب بهداشتی پادگان بود. هم‌چنین برخلاف اکثر مطالعات انجام شده در ایران که در مقیاس پایلوت و آزمایشگاهی کار شده است، در این مطالعه از سیستم گیاه پالایی به کمک وتلند مصنوعی به صورت عملی و کاربردی در مقیاس بزرگ و واقعی برای تصفیه فاضلاب جوامع کوچک کار شده است. از نتایج به دست آمده از این مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که سیستم ترکیبی بی‌هوازی-وتلند مصنوعی نقش مهمی در حفاظت از منابع آب‌های ذخیره منطقه مورد مطالعه دارد و با رعایت استانداردهای لازم و به‌کارگیری واحدهای گندزدایی ساده جهت مصارف آبیاری می‌توان استفاده کرد. هم‌چنین در این سیستم با توجه به طراحی جریان زیر سطحی فرصتی برای تولید مثل و تکثیر حشرات موزی وجود ندارد.

سپاسگزاری

این مقاله نتیجه طرح تحقیقاتی مصوب دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی قزوین با کد اخلاق IR.QUMS.REC.1394.230 می‌باشد. نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از مسئولین محترم دانشکده بهداشت جهت تامین بخشی از هزینه‌های انجام طرح و مسئولین محترم یکی از پادگان‌های آموزشی مستقر در استان و هم‌چنین مدیر عامل محترم شرکت آوادان سازه آرتا جناب آقای مهندس غلامعباس سرخانی به جهت اجرا و ساخت پایلوت بی‌هوازی و وتلند مصنوعی در مقیاس عملیاتی و بهره‌برداری از آن، اعلام می‌دارد.

References

1. Keddy PA. Wetland Ecology: principles and conservation. 2thed. Cambridge: Cambridge University Press; 2010.
2. Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience. Environ Sci Technol 2010; 45(1): 61-69.

3. Sayadi M, Kargar R, Doosti M, Salehi H. Hybrid constructed wetlands for wastewater treatment: A worldwide review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences* 2012; 2(4): 204-222.
4. Abdel-Shafy H, El-Khateeb MA. Integration of septic tank and constructed wetland for the treatment of wastewater in Egypt. *Desalination and Water Treatment* 2013; 51(16-18): 3539-3546.
5. Yousefi Z, Hoseini SM, Mohamadpur Tahamtan R, Zazouli MA. Performance evaluation of artificial wetland subsurface with horizontal flow in wastewater treatment. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2013; 23(99): 12-25 (Persian).
6. Trang NTD, Konnerup D, Schierup H-H, Chiem NH, Brix H. Kinetics of pollutant removal from domestic wastewater in a tropical horizontal subsurface flow constructed wetland system: effects of hydraulic loading rate. *Ecological engineering* 2010; 36(4): 527-535.
7. Mehrizi EA, Sadani M, Farzadkia M, Kermani M, Ghahremani E, Nadafi K. Discussion and Comparison of Efficiency Natural Systems for Wastewater Treatment in Stabilization Pond and Artificial Wetland about Removal Organic Materials and Solids (TSS, BOD5, and COD) in Yazd's Sewage at 2009-2010. *J Basic Appl Sci Res* 2012; 2(2): 1270-1277.
8. Melián JH, Rodríguez AM, Arana J, Díaz OG, Henríquez JG. Hybrid constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in the Canary Islands. *Ecological Engineering* 2010; 36(7): 891-899.
9. Xinshan S, Qin L, Denghua Y. Nutrient removal by hybrid subsurface flow constructed wetlands for high concentration ammonia nitrogen wastewater. *Procedia Environ Sci* 2010; 2: 1461-1468.
10. Mara DD, Cairncross S. Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture: measures for public health protection. Geneva, WHO, 1989.
11. Apha A. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21th ed. Washington. American Public Health Association. 2005.
12. Water Sanitation Health. Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Grey Water. Geneva, Switzerland: World Health Organization Press; 2006.
13. Akrotos CS, Tsihrintzis VA. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering* 2007; 29(2): 173-191.
14. Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water* 2010; 2(3): 530-549.
15. Mara D, Horan NJ. Handbook of water and wastewater microbiology. Massachusetts: Academic press; 2003.
16. Tashaei HR, Mahdavi M, Karakani F, Ghelmani SV, Ataifar H. Application of Horizontal Sub-Surface Flow Constructed Wetland for Treatment of Wastewater in Foreign Countries and Iran. *Journal of Health System Research* 2012; 7(6): 672-683 (Persian).
17. Ehrampoush M, Hosseini SD, Ebrahimi A, Ghaneian M, Lotfi M, Ghelmani V, et al. Evaluation of the Efficiency of Sub-Surface Constructed Wetland Methods in Wastewater Treatment in Yazd City in 2011. *Toloo Behdasht* 2013; 12(1): 33-43.
18. Ge Y, Wang XC, Zheng Y, Dzakupasu M, Xiong J, Zhao Y. Comparison of Slags and Gravels as Substrates in Horizontal Sub-

- surface Flow Constructed Wetlands for Polluted River Water Treatment. *Journal of Water Sustainability* 2014; 4(4): 247-258.
19. Kato K, Moriaka R, Hosokawa H, Osada H, Kanazawa K, Nozoe T. Preliminary studies on hybrid wetland systems for purification of milking parlor wastewater in northern part of Japan. *International Symposium on Wetland Pollutant Dynamics and Control (WETPOL)*, Sep 4-8; 2005, Ghent, Belgium.
 20. Yeh T, Wu C. Pollutant removal within hybrid constructed wetland systems in tropical regions. *Water Sci Technol* 2009; 59(2): 233-240.
 21. Domingos S, Germain M, Dallas S, Ho G. Nitrogen removal from industrial wastewater by hybrid constructed wetland systems In 2th IWA-ASPIRE Conference and Exhibition, 28 October 31 November, Perth, Western Australia, 2007.
 22. Cui L-h, Liu W, Zhu X-z, Ma M, Huang X-h, Xia Y-y. Performance of hybrid constructed wetland systems for treating septic tank effluent. *J Environ Sci* 2006; 18(4): 665-669.
 23. Seo DC, Hwang SH, Kim HJ, Cho JS, Lee HJ, DeLaune RD, et al. Evaluation of 2-and 3-stage combinations of vertical and horizontal flow constructed wetlands for treating greenhouse wastewater. *Ecological Engineering* 2008; 32(2): 121-132.
 24. Sharafi K, Drayat J, Khodadadi T, Asadi F, Poureshg Y. The efficiency comparison of constructed wetland and conventional activated sludge on removal of cysts and parasitic eggs-case study: Ghasr-e-Shirin and Kermanshah wastewater treatment plants. *Journal of Health & Hygiene* 2011; 2(3): 7-13.
 25. Huddleston GM, Gillespie WB, Rodgers JH. Using constructed wetlands to treat biochemical oxygen demand and ammonia associated with a refinery effluent. *Ecotoxicol Environ Saf* 2000; 45(2): 188-193.